

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ОРЛОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени И.С. ТУРГЕНЕВА»

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

по направлению подготовки 13.03.02. а – Электроэнергетика и
электротехника
профиль: «Электрооборудование и электрохозяйство предприятий,
организаций и учреждений»

Студента Косякова Максима Максимовича, шифр 120988

ИНСТИТУТ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ,
АВТОМАТИЗАЦИИ И ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Тема выпускной квалификационной работы
«Проектирование индукционных устройств для нагрева прямоугольных и
цилиндрических металлических заготовок в машиностроении»

Студент



(подпись)

М.М.Косяков

Руководитель
д.т.н., профессор



(подпись)

А.Н. Качанов

Нормоконтроль
к.т.н., доцент



(подпись)

А.В. Мезенцева

Заведующий кафедрой
д.т.н., профессор



(подпись)

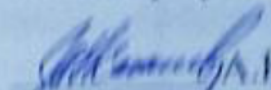
А.Н. Качанов

Орел 2017 г.

Кафедра «Электрооборудование и энергосбережение»

УТВЕРЖДАЮ

зав. кафедрой,
д.т.н., профессор


А.Н. Качанов
«10» ноября 2016 г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы по направлению подготовки
13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Студент: **Косинов** Максим Максимович, шифр: 120988

1. Тема ВКР: «Проектирование индукционных устройств для нагрева прямоугольных и цилиндрических металлических заготовок в машиностроении». Утверждена приказом № 2-1664 по университету от «08» ноября 2016 г.

2. Срок сдачи студентом законченной работы «10» июня 2017 г.

3. Исходные данные к работе: Материал и геометрические размеры заготовок – сталь 45; ст. 12X18H9T; алюминий и латунь; длина загрузок (l_1) – 450 – 950 мм; диаметр загрузок – 80 – 200 мм; ширина (b_2) и высота (h_2) прямоугольных загрузок – (60–120) – (65–125) мм; время сквозного нагрева заготовок (τ_n) – (100 – 950) с; температура нагрева (t_n) – для немагнитных материалов до температуры ниже температуры плавления, для магнитных материалов до ковочных температур; Рабочая частота (f) – от 50 Гц до 150 кГц; температура окружающей среды – 20°C;

4. Содержание пояснительной записки

Введение.

4.1. Анализ использования индукционных устройств для нагрева прямоугольных и цилиндрических магнитных и немагнитных металлических заготовок в машиностроении.

4.2. Анализ влияния изменения электрофизических свойств материалов в процессе их нагрева на режимы работы индукционных устройств для сквозного нагрева металлических заготовок.

4.3. Расчет оптимальной частоты источника тока для питания индукционной установки для сквозного нагрева заготовок.

4.4. Выбор инженерной методики расчета и программных продуктов для расчета индукционных устройств, обеспечивающих сквозной нагрев заготовок.

4.5. Разработка блок-схемы расчета индукционного устройства для сквозного нагрева заготовок.

4.6. Расчет распределения основных параметров электромагнитного поля (E и H) и внутренних источников тепла по сечению цилиндрических и прямоугольных

магнитных и немагнитных металлических заготовок с использованием программных продуктов Ferro 2 и ELCUT.

4.7. Рассчитать электрические и энергетические величины индукционного устройства (по согласованию с руководителем) для сквозного нагрева заготовок (активные и реактивные мощности устройства и в загрузке, $\cos\phi$, электрический КПД).

4.8. Выбрать и рассчитать с учетом требований ПУЭ и ПТБ конструкцию, оптимальные схемы электроснабжения и управления режимами работы индукционного устройства для сквозного нагрева заготовок.

Заключение

5. Перечень демонстрационного материала:

5.1. Результаты анализа влияния изменения электрофизических свойств материалов в процессе их нагрева на режимы работы индукционных устройств для сквозного нагрева металлических заготовок – 1 лист, А1


5.2. Результаты расчетов распределения основных параметров электромагнитного поля (Е и Н) и внутренних источников тепла по сечению цилиндрических и прямоугольных магнитных и немагнитных металлических заготовок с использованием программных продуктов Ferro 2 и ELCUT – 2 листа, А1.

5.3. Конструкция, электротехнические характеристики, электрические схемы электроснабжения и управления режимами работы индукционного устройства для сквозного нагрева металлических заготовок – 1 лист, А1.

6. Консультанты по ВКР (с указанием относящихся к ним разделов)

Раздел	Консультанты	Подпись, дата	
		Задание выдал	Задание принял
4.1 – 5.3	Качанов А.Н.		

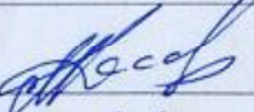
Дата выдачи задания «10» ноября 2016 г.

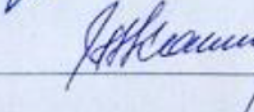
Руководитель ВКР _____  А.Н. Качанов

Задание принял к исполнению _____  М.М. Косяков

Календарный план

Наименования этапов ВКР	Сроки выполнения этапов работы	Примечание
4.1 – 4.2	10.11.2016 – 30.12.2016 г.	
4.3 – 4.5	01.01.2017 – 10.03.2017 г.	
4.6 – 4.8	11.03.2017 – 25.05.2017 г.	
5.1 – 5.3	26.05.2017 – 10.06.2017 г.	

Студент _____  М.М. Косяков

Руководитель ВКР _____  А.Н. Качанов

Аннотация

Целью выпускной квалификационной работы является проектирование индукционных устройств для сквозного нагрева металлических заготовок.

Произведен анализ основных компьютерных программ для расчета электромагнитных полей. С помощью программного пакета ELCUT произведено моделирование индукционного нагрева. Получены картины распределения тока, напряженности магнитного поля и температуры в системе.

Представлены электрические и тепловые расчеты, расчеты водоохлаждения и компенсирующих устройств. Разработана конструкция индуктора. Разработаны принципиальная электрическая схема и схема управления и сигнализации установки. Выбрано основное электрооборудование. Также рассмотрены вопросы безопасности.

Стр. 104, рис. 46, табл. 21, библиограф. 18 наименований

УДК: [621.313.13: 621.311.54]:628.12

The summary

The purpose of final qualifying work is the design of induction devices for the through heating of metal ingot.

The analysis of the basic computer programs for calculation of electromagnetic fields is made. Modeling of induction heating is carried out with the help of ELCUT software package. The patterns of current distribution, magnetic field intensity and temperature in the system are obtained.

Electric and thermal calculations, calculations of water cooling and compensating devices are presented. The design of the inductor is developed. A basic electrical circuit and a control and alarm system for the installation have been developed. The main electrical equipment is selected. Also, occupational Safety and Health issues are considered.

Pp. 104, fig. 46, table 21, the bibl. 18 items.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	8
1 Анализ использования индукционных устройств для сквозного нагрева прямоугольных и цилиндрических магнитных и немагнитных материалов в машиностроении	9
1.1 Применение индукционного нагрева.....	9
1.2 Сквозной индукционный нагрев заготовок машиностроении	10
2 Анализ влияния изменения электрофизических свойств материалов в процессе их нагрева на режимы работы индукционных устройств для сквозного нагрева металлических заготовок	12
2.1 Электрофизические свойства материалов, зависящие от температуры.....	12
2.2 Анализ влияния изменения электрофизических свойств материалов в процессе их нагрева на работу индукционных устройств	16
3 Расчет оптимальной частоты источника тока для питания индукционной установки сквозного нагрева	18
3.1 Учет факторов, влияющих на выбор частоты источника питания для индукционного нагрева	18
3.2 Расчет оптимальной частоты источника тока для питания индукционной установки для сквозного нагрева заготовок.....	22
4 Выбор инженерной методики расчета и программных продуктов для расчета индукционных устройств	24

ВКР.13.03.02.10.17.ПЗ

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				
Разраб.		Косяков М.М.	<i>[Подпись]</i>	12.06.17	Проектирование индукционных устройств для нагрева прямоугольных и цилиндрических металлических заготовок в машиностроении	Лит.	Лист	Листов
Провер.		Качанов А.Н.	<i>[Подпись]</i>	15.06.17			5	104
Н. контр.		Мезенцева А.В.	<i>[Подпись]</i>	15.06.17		ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева» гр. 41 - ЭО		
Утверд.		Качанов А.Н.	<i>[Подпись]</i>	20.06.17				

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	8
1 Анализ использования индукционных устройств для сквозного нагрева прямоугольных и цилиндрических магнитных и немагнитных материалов в машиностроении	9
1.1 Применение индукционного нагрева.....	9
1.2 Сквозной индукционный нагрев заготовок машиностроении	10
2 Анализ влияния изменения электрофизических свойств материалов в процессе их нагрева на режимы работы индукционных устройств для сквозного нагрева металлических заготовок	12
2.1 Электрофизические свойства материалов, зависящие от температуры.....	12
2.2 Анализ влияния изменения электрофизических свойств материалов в процессе их нагрева на работу индукционных устройств	16
3 Расчет оптимальной частоты источника тока для питания индукционной установки сквозного нагрева	18
3.1 Учет факторов, влияющих на выбор частоты источника питания для индукционного нагрева	18
3.2 Расчет оптимальной частоты источника тока для питания индукционной установки для сквозного нагрева заготовок.....	22
4 Выбор инженерной методики расчета и программных продуктов для расчета индукционных устройств	24

<i>ВКР.13.03.02.10.17.ПЗ</i>											
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>							
<i>Разраб.</i>		<i>Косяков М.М.</i>	<i>[Подпись]</i>	<i>12.06.17</i>	Проектирование индукционных устройств для нагрева прямоугольных и цилиндрических металлических заготовок в машиностроении						
<i>Провер.</i>		<i>Качанов А.Н.</i>	<i>[Подпись]</i>	<i>15.06.17</i>							
<i>И. контр.</i>		<i>Мезенцева А.В.</i>	<i>[Подпись]</i>	<i>15.06.17</i>							
<i>Утверд.</i>		<i>Качанов А.Н.</i>	<i>[Подпись]</i>	<i>20.06.17</i>							
					<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 33%;"><i>Лит.</i></td> <td style="width: 33%;"><i>Лист</i></td> <td style="width: 33%;"><i>Листов</i></td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;">5</td> <td style="text-align: center;">104</td> </tr> </table> ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева» гр. 41 - 30	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>		5	104
<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>									
	5	104									

4.1	Физические основы индукционного нагрева	24
4.2	Выбор инженерной методики расчета индукционного устройства, обеспечивающий сквозной нагрев заготовки.....	25
4.3	Выбор программных продуктов для расчета индукционных устройств ..	28
5	Разработка блок-схемы расчета индукционной установки сквозного нагрева	31
5.1	Математические модели индукционного нагревателя.....	31
5.2	Разработка блок-схемы.....	32
6	Расчет распределения основных параметров электромагнитного поля и внутренних источников тепла по сечению цилиндрических и прямоугольных заготовок	35
6.1	Построение геометрической модели системы «индуктор – цилиндрическая загрузка».....	35
6.2	Построение геометрической модели системы «индуктор-загрузка прямоугольного сечения».....	38
6.3	Математическая модель системы «индуктор – загрузка»	40
7	Расчет электрических параметров индукторов для нагревателей переодического действия для сквозного нагрева заготовок.....	50
7.1	Этапы нагрева и изменения потребляемой мощности в процессе нагрева	50
7.2	Расчет индуктора по этапам нагрева для ферромагнитной цилиндрической загрузки	52
8	Разработка конструкции принципиальной электрической схемы электроснабжения индукционного устройства для сквозного нагрева с учетом ПУЭ и ПТБ.....	80
8.1	Силовая электрическая схема установок индукционного нагрева	80

8.2	Схема управления и сигнализации установки индукционного нагрева ...	82
8.3	Расчет мощности и выбор конденсаторных батарей.....	84
8.4	Расчет охлаждения индуктора	85
8.5	Механизм загрузки установки индукционного нагрева периодического действия	88
8.6	Конструкция индуктора.....	89
8.7	Техника безопасности при эксплуатации установок индукционного нагрева	91
ЗАКЛЮЧЕНИЕ		94
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ		95
ПРИЛОЖЕНИЕ А		94
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....		100

4.3 Выбор программных продуктов для расчета индукционных устройств

Среди существующего многообразия программных продуктов, предназначенных для решения полевых задач, можно выделить четыре универсальных пакета такого рода: Elcut, Femlab, ANSYS, Ferro2.

Elcut – практически единственный отечественный пакет пригодный для моделирования устройств индукционного нагрева. Femlab – интегрируемый в MATLAB новейший пакет для решения полевых задач. ANSYS – один из самых мощных пакетов конечно элементного анализа. Ferro2 – устаревшая программа с ограниченным функционалом работающая под управлением операционной системы MS-DOS.

Пакет ANSYS обладает наибольшим числом достоинств. Это единственный пакет среди перечисленных, позволяющий моделировать переход материала из твердого состояния в жидкое и наоборот (фазовый переход), что особенно важно при моделировании процесса расплавления металла в индукционных печах. Однако сложность интерфейса программы, большое число параметров ее настройки и почти полное отсутствие учебников по программе на русском языке затрудняют ее использование [6].

Пакет Femlab обладает почти такими же возможностями, как и пакет ANSYS. У пакета Femlab есть возможность экспорта конечноэлементной модели в Simulink (инструмент моделирования динамических систем, встроенный в MATLAB). Это позволяет моделировать не только простейшие внешние электрические цепи, но и работу установки совместно с преобразователями электрической энергии, системами управления; исследовать частотные характеристики и устойчивость электротехнологической установки [6].

Основные отличия программных пакетов представлены в таблице 4.1.

					<i>ВКР.13.03.02.10.17.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		28

Таблица 4.1 – Основные отличия программных пакетов

№ п/п	Возможности пакета	Elcut	Femlab	ANSYS	Ferro2
1	<i>Вид анализа:</i>				
	Электромагнитный	да	да	да	да
	Тепловой	да	да	да	да
	Гидрогазодинамический	нет	да	да	нет
2	<i>Тип расчета:</i>				
	Статический	да	да	да	да
3	<i>Геометрическая модель:</i>				
	Двухмерная	да	да	да	нет
	Осесимметричная	да	да	да	да
4	Трехмерная	да	да	да	нет
	Выбор типа конечного элемента	нет	нет	да	нет
5	Возможность моделирования внешних электрических цепей	да	Да (экспорт в Simulink)	да	нет
6	Наличие библиотеки материалов	нет	да	да	нет

Среди рассматриваемых программ Ferro2, обладает ограниченными возможностями. Кроме того, интерфейс программы неудобный. Программа запускается только с помощью дополнительного ПО на современных компьютерах. Производит расчет только цилиндрических загрузок и загрузок прямоугольного сечения. Шаг дискретизации не регулируется. Программа производит расчет достаточно долго, может произойти заикливание если расчетная температура окажется ниже заданной. Морально устаревшая программа, которая серьезно уступает конкурентам.

Наиболее серьезным недостатком пакета ELCUT является то, что в этой

программе отсутствует возможность одновременного решения нескольких полевых задач (электромагнитной и тепловой). Это не позволяет автоматически учитывать изменение свойств материалов в процессе расчета. К примеру, нельзя учесть изменение магнитной проницаемости нагреваемого установкой металла при изменении его температуры. Данный недостаток можно частично преодолеть, разбив временной отрезок, на котором производится тепловой расчет, на несколько отдельных участков. На каждом из таких участков необходимо предварительно решать электромагнитную задачу с новыми значениями свойств материалов [6].

Преимуществом пакета ELCUT является наличие русскоязычной версии, документации на русском языке, большое количество примеров, поставляемых с программой.

Для моделирования индукционного нагрева был выбран программный продукт ELCUT.

					<i>ВКР.13.03.02.10.17.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		30

5 РАЗРАБОТКА БЛОК-СХЕМЫ РАСЧЕТА ИНДУКЦИОННОЙ УСТАНОВКИ СКВОЗНОГО НАГРЕВА

5.1 Математические модели индукционного нагревателя

Математические модели индукционных нагревателей, реализованные в разных программных продуктах (Elcut, Ansys, Femlab, Ferro2) имеют большое число компонентов, которые зависят от числа процессов, учитываемые при их построении. Общими для всех моделей являются тепловые и электромагнитные процессы. Остальные процессы определяются назначением устройства и целью моделирования. К ним можно отнести процессы возникновения напряжений в металле, процессы деформации нагреваемого металла при зонном нагреве или закалке, гидродинамические процессы в жидком металле, процессы структурных превращений при термообработке, аварийные процессы во внешних цепях и т.д.

В зависимости от числа пространственных координат модели разделяются на двух- и трехмерные. Комбинированные модели обладают высокой степенью соответствия натурному устройству и позволяют решать очень широкий круг задач. Прежде всего они дают большой объем информации о характере тепловых, электромагнитных и иных параметров в системе. Эта информация помогает яснее понять физическую картину происходящих явлений и получить их количественные характеристики. Моделирование резко сокращает объем трудоемких и дорогих натуральных экспериментов при разработке новых процессов и установок, позволяя исследовать переходные и установившиеся режимы, а также такие режимы, как аварийные, экспериментальное изучение которых крайне затруднено. При наличии модели процесса или установки роль натуральных экспериментов сводится к проверке ее адекватности процессу, уточнению параметров модели и отработке принятых конструкций с целью их коррекции и выявления влияния процессов, не учтенных при построении модели [2].

					ВКР.13.03.02.10.17.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		31

5.2 Разработка блок-схемы

Рассмотрим модели, используемые при исследовании и проектировании установок индукционного нагрева немагнитных цилиндрических слитков.

Модели относятся к двухкомпонентным и состоят из трех основных частей (блоков): тепловой, электрической и информационно-логической.

В тепловом и электрическом блоках производится расчет соответствующих полей. Информационно-логический блок осуществляет ввод и вывод информации, а также взаимодействие остальных частей программы, определяемое конкретной структурой нагревателя и режимом его работы.

Геометрическая модель с конечноэлементной сеткой для электрического и теплового расчета на примере программного продукта Elcut представлена на рисунке 5.1. Если поверхностный эффект сильно выражен, то сетка задается неравномерной – устанавливается меньший шаг дискретизации по краям индуктора и загрузки, это позволяет производить расчеты более точно.

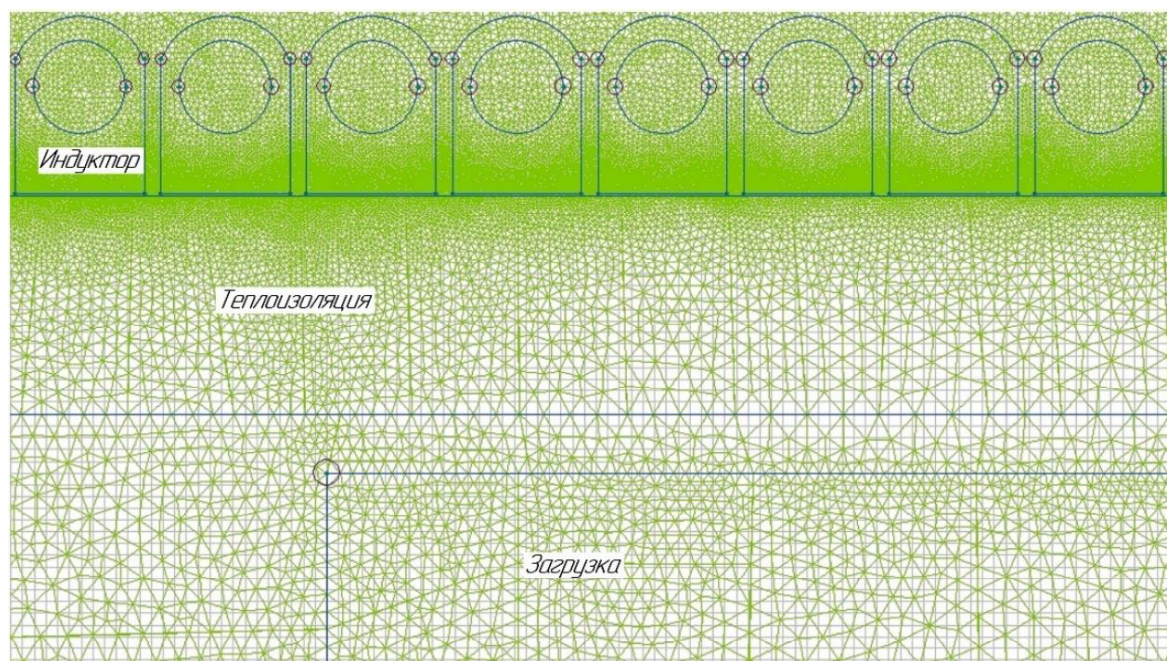


Рисунок 5.1 – Геометрическая модель с конечноэлементной сеткой
в программе Elcut

Модель установившегося режима содержит следующие основные блоки (рисунок 5.2): блок формирования сеток электрического и теплового расчета, блок электрического расчета, блок интерполяции источников тепла для ввода в тепловую задачу, блок теплового расчета [2].

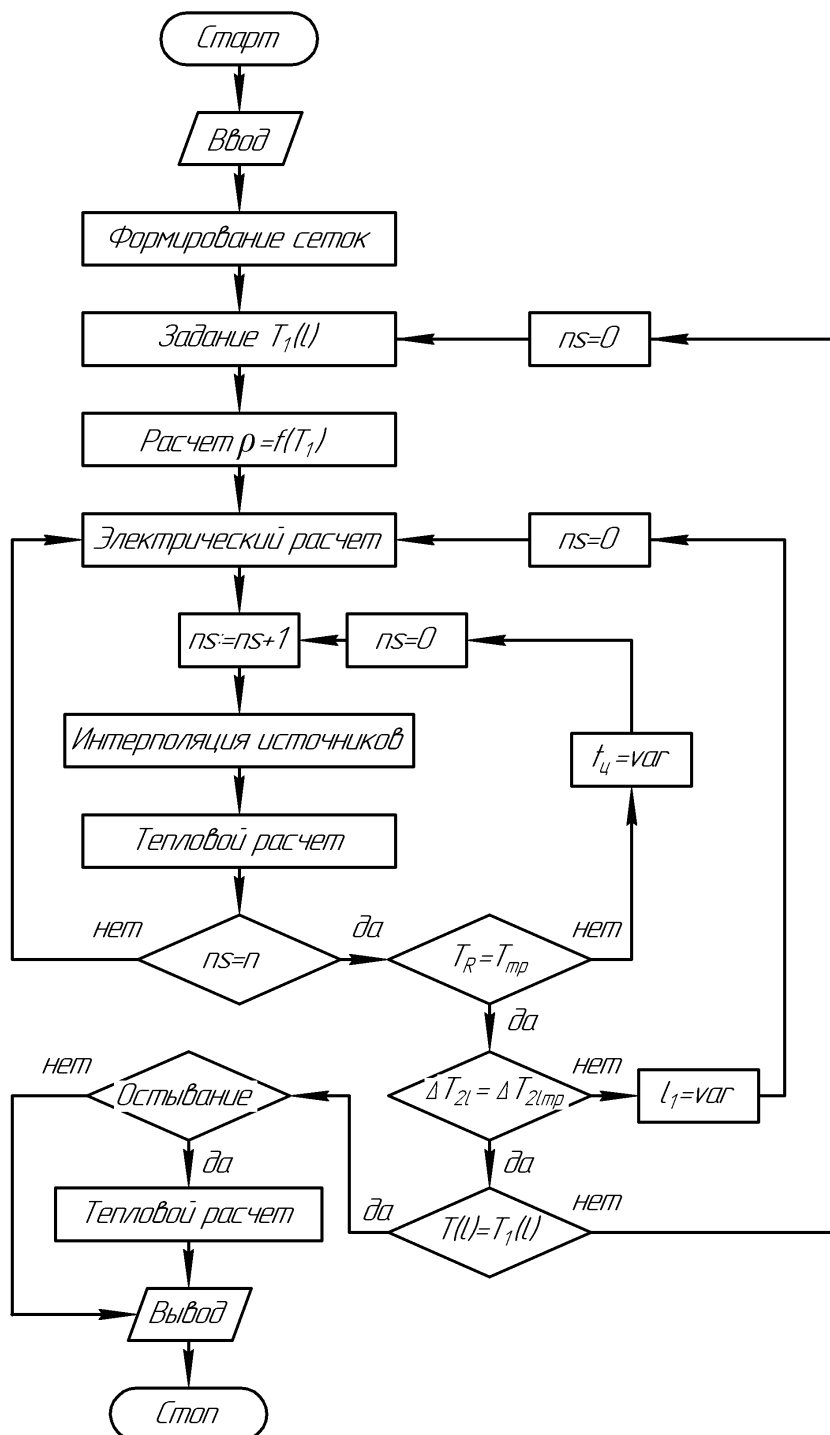


Рисунок 5.2 – Блок-схема модели для расчёта индукционного нагревателя

В установившемся режиме температурное поле изменяется во времени с периодом $t_{ц}$. Поскольку распределение температуры $T_1(l)$ по длине слитков в начале периода неизвестно, задают его заранее, что позволяет найти удельное сопротивление материала слитков $\rho = f(T_1)$ и выполнить электрический расчет.

Из решения электрической задачи определяются источники тепла. Затем производится тепловой расчет одного из n слитков по мере продвижения его в индукторе, учитывающий условия стационарной теплоотдачи с боковых сторон и теплообмена между торцевыми плоскостями слитков. Источники тепла берутся из электрического расчета в соответствии с положением слитка в данном интервале времени n_s . По окончании теплового расчета проверяется соответствие распределения температуры T_R по радиусу выходного слитка требуемому по условиям технологии $T_{ТР}$. В случае несоответствия предусмотрено изменение мощности индуктора или темпа проталкивания слитков. После достижения заданного распределения по радиусу проверяется перепад температуры по длине выходного слитка ΔT_2 . Если необходимо, изменяется длина индуктора l_1 и расчет повторяется.

Когда требуемая равномерность нагрева загрузки на выходе достигнута, проверяется соответствие распределения температуры по длине столба слитков $T(l)$ принятому в начале расчета. При значительных расхождениях распределение корректируется и расчет повторяется. Предусмотрен расчет температурного поля при транспортировке слитка из нагревателя в пресс.

					<i>ВКР.13.03.02.10.17.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		34

6 РАСЧЕТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ И ВНУТРЕННИХ ИСТОЧНИКОВ ТЕПЛА ПО СЕЧЕНИЮ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ И ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ЗАГОТОВОК

6.1 Построение геометрической модели системы «индуктор – цилиндрическая загрузка»

Исходные данные для расчета индуктора приведены в таблице 6.1 характеристики нагреваемого материала сводим в таблицу 6.2

Таблица 6.1 – Исходные данные для расчета параметров индуктора.

Диаметр заготовки D_2 , мм	Длина заготовки l_2 , мм	Температура нагрева T , °C	Перепад температуры ΔT , °C	Материал загрузки
100	500	1200	150	сталь 45
80	300	800	50	латунь

Таблица 6.2 – Характеристики нагреваемого материала

Материал	Плотность ρ , кг/м ³	Теплопроводность λ , $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$	Теплоемкость c , $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$	Уд. электрическая проводимость σ , См/м	Отн. магнитная проницаемость μ_r	Температуропроводность a_1 , м ² /с
сталь 45	$7,826 \cdot 10^3$	27	$6,62 \cdot 10^2$	$7,7 \cdot 10^6$	10000	$6,4 \cdot 10^{-6}$
латунь	$8,60 \cdot 10^3$	111	0,385	$1,25 \cdot 10^7$	0,99992	$34,17 \cdot 10^{-6}$

6.1.1. Выбор основных конструктивных решений

Расчет произведем на примере заготовки из латуни.

Диаметр индуктора найдем по формуле:

$$D_1 = 1,6 \cdot D_2, \quad [\text{м}] \quad (6.1)$$

$$D_1 = 1,6 \cdot 0,8 = 0,128. \quad [\text{м}]$$

Равномерный нагрев заготовок по всей длине может быть обеспечен, если длина индуктора выбрана из соотношения:

$$l_1 = l_2 + (1 \div 1,5)D_1, \quad [\text{м}] \quad (6.2)$$

где l_2 – длина заготовки, м.

$$l_1 = 0,3 + 0,128 = 0,428 \quad [\text{м}]$$

Внутренний диаметр теплоизоляции:

$$D_3 = 1,12 \cdot D_2, \quad [\text{м}] \quad (6.3)$$

$$D_3 = 1,12 \cdot 0,08 = 0,09 \quad [\text{м}]$$

Эскиз индуктора с цилиндрической загрузкой представлен на рисунке 6.1.

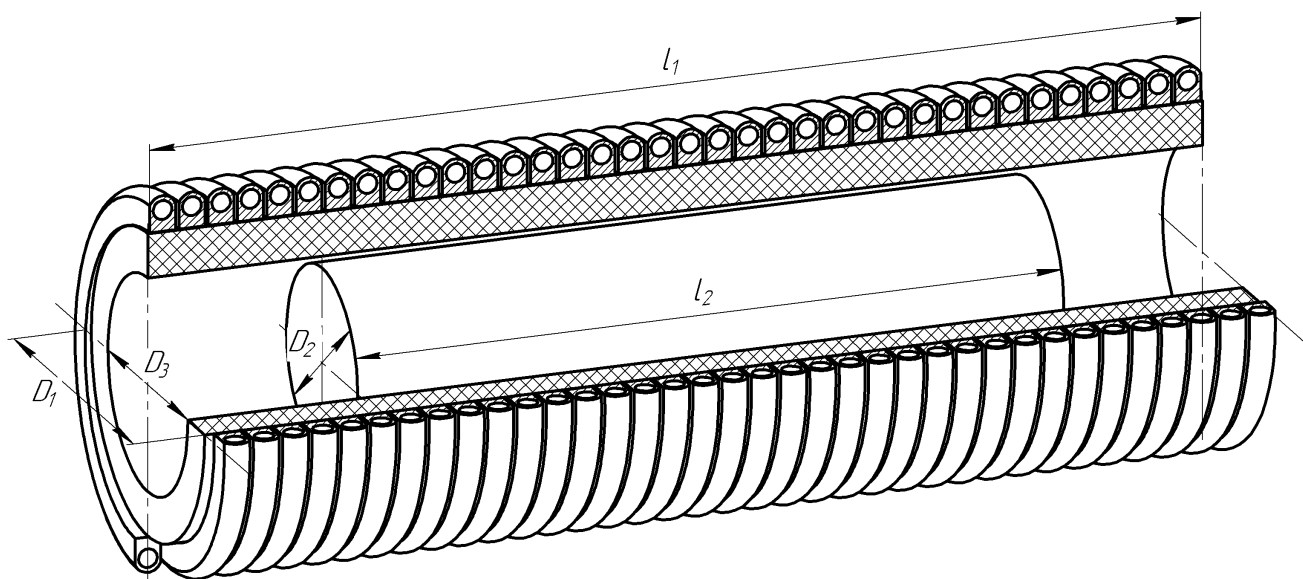


Рисунок 6.1 – Система «индуктор – цилиндрическая загрузка»

Толщину передней стенки индуцирующего провода принимаем близкой к оптимальной:

$$d_{\text{лопт}} = 1,6 \cdot \Delta_1, \quad [\text{м}] \quad (6.4)$$

где Δ_1 – глубина проникновения тока в медь, [м].

Глубина проникновения тока в медь определяется по формуле:

$$\Delta_1 = \frac{0,07}{\sqrt{f}}, \text{ м} \quad [\text{м}] \quad (6.5)$$

$$\Delta_1 = \frac{0,07}{\sqrt{500}} = 2,98 \cdot 10^{-3} \quad [\text{м}]$$

Тогда толщина передней стенки индуктора d_1 :

$$d_{\text{лопт}} = 1,6 \cdot 2,98 \cdot 10^{-3} = 5,01 \cdot 10^{-3} \quad [\text{м}]$$

Принимаем $d_1 = 5$ [мм].

Индуктор выполнен из медной профилированной водоохлаждаемой трубки, представленный на рисунке 6.2 [14]., с площадью отверстия $s = 0,5 \cdot 10^{-4} [\text{м}^2]$.

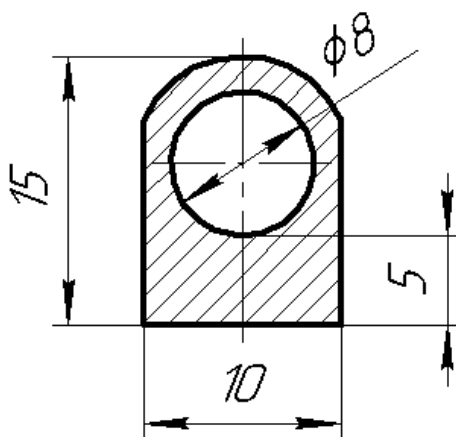


Рисунок 6.2 – Сечение трубки индуктора

Геометрические модели систем «Индуктор - цилиндрическая загрузка» представлены на рисунках Б.1, Б.2.

6.2 Построение геометрической модели системы «индуктор-загрузка прямоугольного сечения»

Исходные данные для расчета индуктора приведены в таблице 6.3.

Таблица 6.3 – Исходные данные для расчета параметров индуктора

Высота заготовки D_2 , мм	Ширина заготовки b_2 , мм	Длина заготовки l_2 , мм	Температура нагрева T , °C	Перепад температуры ΔT , °C	Материал загрузки
70	70	450	500	50	алюминий
60	120	450	1200	100	ст. 12X18H9T

Характеристики нагреваемого материала сводим в таблицу 6.4

Таблица 6.4 – Характеристики нагреваемого материала

Материал	Плотность ρ , кг/м ³	Теплопроводность λ , $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$	Теплоемкость c , $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$	Уд. электрическая проводимость σ , См/м	Отн. магнитная проницаемость μ_r	Температуропроводность a_1 , м ² /с
ст. 12X18H9T	$7,9 \cdot 10^3$	29	$5,75 \cdot 10^2$	$8,06 \cdot 10^5$	1,04	$6,4 \cdot 10^{-6}$
алюминий	$2,71 \cdot 10^3$	209	$8,96 \cdot 10^2$	$3,7 \cdot 10^7$	1,000022	$94,44 \cdot 10^{-6}$

6.2.1 Выбор основных конструктивных решений

Расчет произведем на примере заготовки из стали 12X18H9T.

Размер окна индуктора. Высота индуктора:

$$D_1 = (1,3 \div 3) \cdot D_2, \quad [\text{м}] \quad (6.6)$$

$$D_1 = 1,6 \cdot 0,06 = 0,096 \quad [\text{м}]$$

Ширина индуктора:

$$b_1 = b_2 + (D_1 - D_2), \quad [\text{м}] \quad (6.7)$$

$$b_1 = 0,12 + (0,096 - 0,06) = 0,156 \quad [\text{м}]$$

Равномерный нагрев заготовок по всей длине может быть обеспечен, если длина индуктора выбрана из соотношения (6.2):

$$l_1 = 0,45 + 0,096 = 0,546 \quad [\text{м}]$$

Толщина теплоизоляции $d_{\text{из}} = 0,012 [\text{м}]$.

Глубина проникновения тока в медь определяется по формуле (6.5):

$$\Delta_1 = \frac{0,07}{\sqrt{1000}} = 2,21 \cdot 10^{-3} \quad [\text{м}]$$

Эскиз индуктора с загрузкой прямоугольного сечения представлен на рисунке 6.3. Толщину передней стенки индуцирующего провода принимаем близкой к оптимальной формула (6.4). Тогда толщина передней стенки индуктора d_1 :

$$d_{1\text{опт}} = 1,6 \cdot 2,21 \cdot 10^{-3} = 3,54 \cdot 10^{-3} \quad [\text{м}]$$

Принимаем $d_1 = 4 [\text{мм}]$.

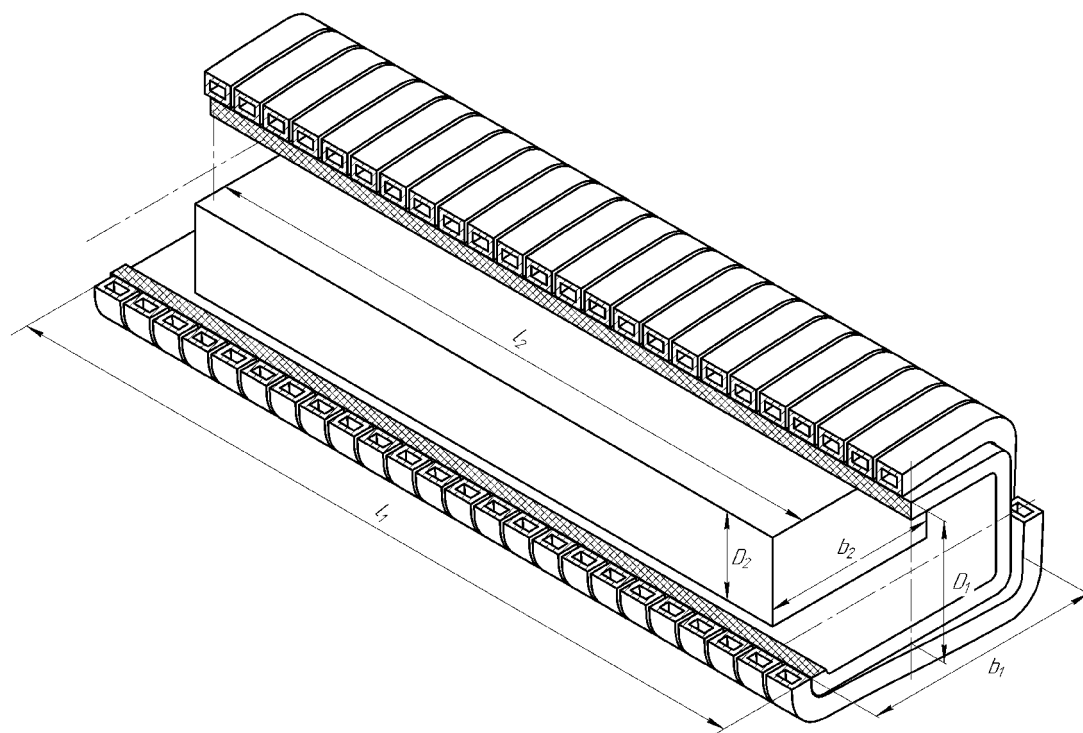


Рисунок 6.3 – Система «индуктор – загрузка»

Индуктор выполнен из медной профилированной водоохлаждаемой трубки прямоугольного сечения (таблица А2) [14], представленный на рисунке 6.4., с площадью отверстия $s = 0,84 \cdot 10^{-4} \text{ [м}^2 \text{]}$.

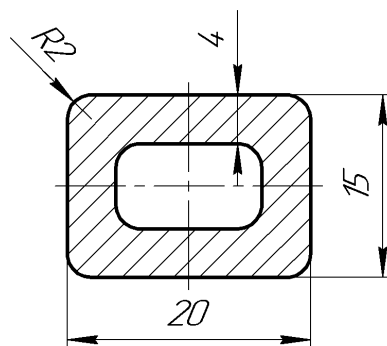


Рисунок 6.4 – Сечение трубки индуктора

Геометрические модели систем «Индуктор – загрузка прямоугольного сечения» представлены на рисунке Б.3 и Б.4.

6.3 Математическая модель системы «индуктор – загрузка»

6.3.1 Описание программы Elcut

Процесс нагрева металлического цилиндра смоделирован в программе Elcut [8]. Elcut – это интегрированная диалоговая система программ, позволяющая решать плоские и осесимметричные задачи следующих типов:

- расчет электрического поля (электростатическое поле, электрическое поле постоянных и переменных токов, нестационарное электрическое поле);
- расчет магнитного поля (магнитостатическое поле, магнитное нестационарное поле и магнитное поле переменных токов);
- расчет температурного поля (стационарная и нестационарная теплопередача);
- задачи механической прочности (линейный анализ напряженно – деформированного состояния);

					ВКР.13.03.02.10.17.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		40

- мультидисциплинарные (связанные) задачи.

Для моделирования процесса нагрева загрузки необходимо решить мультидисциплинарную задачу. Расчет внутренней энергии примыкающего индуктора производится в задаче магнитного поля переменных токов. Получив данные о внутренней энергии и распределении магнитного потока, возможно решить вторую задачу – нестационарную теплопередачу, связав ее с предыдущей.

Для расчета Elcut использует метод конечных элементов [9]. В качестве единственного типа конечных элементов разработчиками был выбран линейный треугольник. Использование метода конечных элементов позволяет практически снять ограничения на сложность расчетной области, свойства материалов.

6.3.2 Результаты исследования сквозного нагрева цилиндрической загрузки

На первом этапе моделирования рассмотрен сквозной нагрев цилиндра из ферромагнитного материала – сталь 45. Картина напряженности магнитного поля представлена на рисунке 6.5. Черными линиями показаны линии магнитного поля, цветная картина – распределение напряженности магнитного поля.

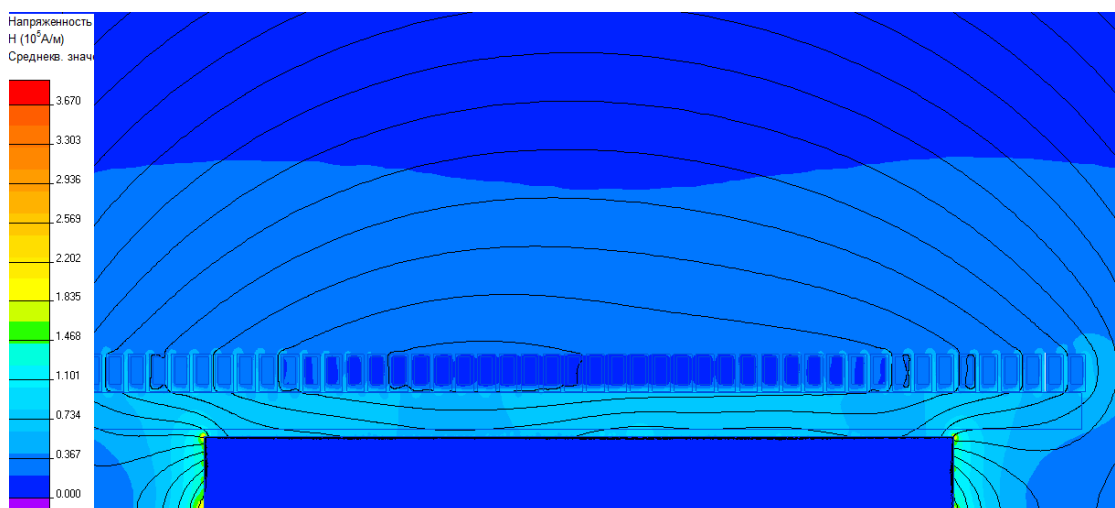


Рисунок 6.5 - Картина распределения напряженности магнитного поля при сквозном нагреве цилиндрической заготовки

График распределения плотности тока по сечению загрузки в начале нагрева представлен на рисунке 6.6.

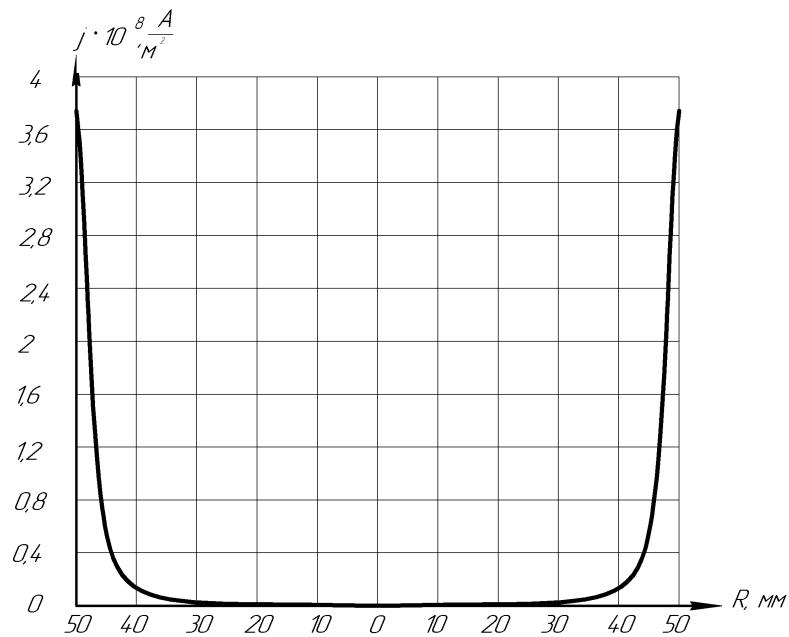


Рисунок 6.6 – График распределения плотности тока по сечению загрузки

Картина распределения плотности тока представлена на рисунке 6.7. Черными линиями показаны линии магнитного поля, цветная картина – распределение плотности тока. Наибольшее значение плотности тока в загрузке на поверхности $j = 1,6 \cdot 10^7 \left[\frac{A}{M^2} \right]$, а по толщине материала она уменьшается.

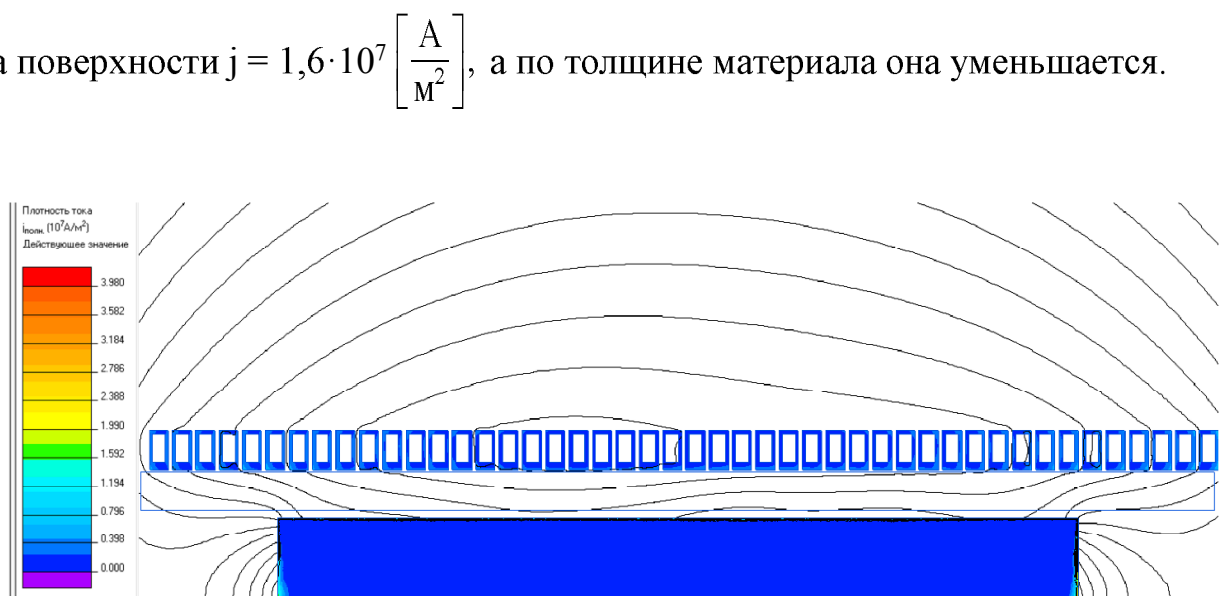


Рисунок 6.7 - Картина распределения плотности тока

Картина распределения температуры по сечению загрузки на двадцатой секунде нагрева представлена на рисунке 6.8.

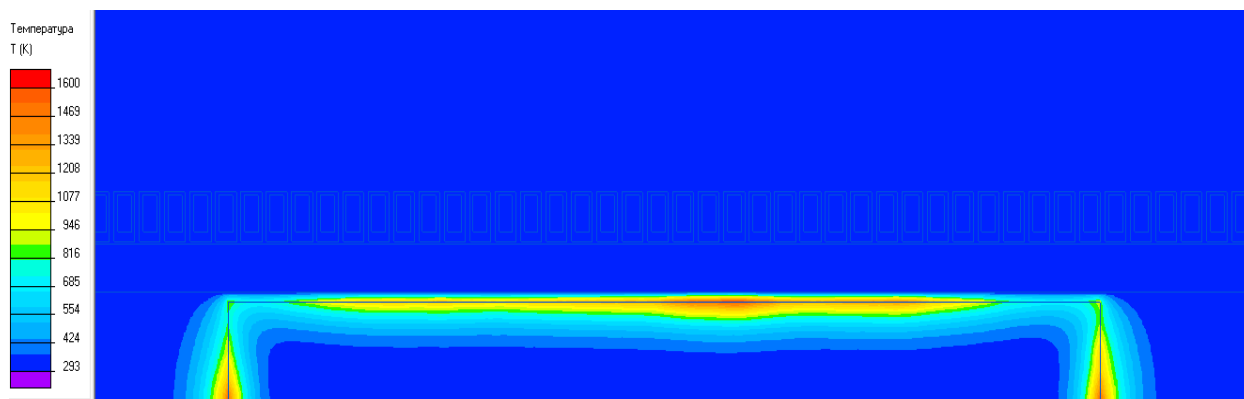


Рисунок 6.8 – Картина распределения температуры по объему загрузки на двадцатой секунде нагрева

Картина распределения температуры по сечению загрузки в конце нагрева представлена на рисунке 6.9. Разница температур по объему загрузки составляет $73,93 [^{\circ}\text{C}]$.

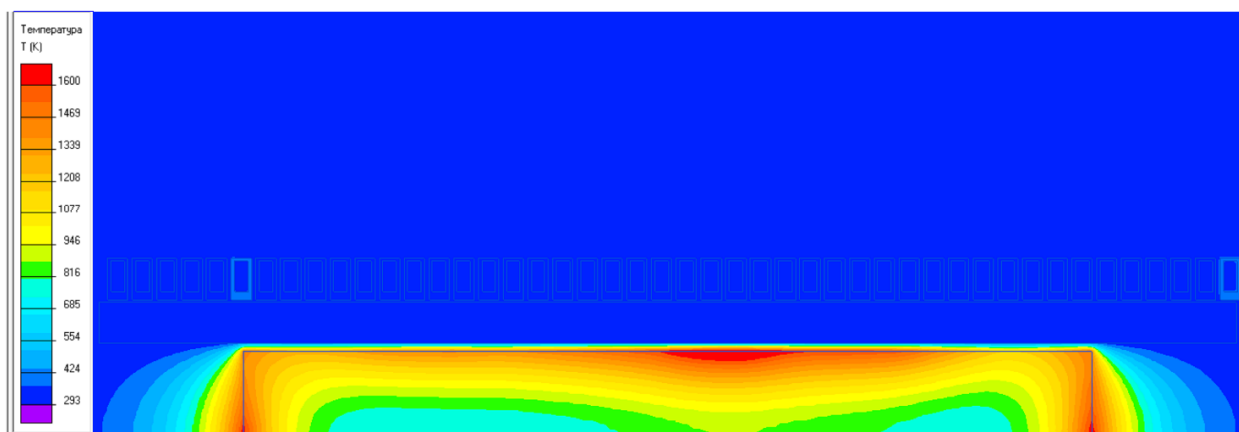


Рисунок 6.9 – Картина распределения температуры по объему загрузки в конце нагрева

На втором этапе моделирования рассмотрен сквозной нагрев цилиндра из немагнитного материала – латуни. Картина напряженности магнитного поля представлена на рисунке 6.10. Черными линиями показаны линии магнитного поля, цветная картина – распределение напряженности магнитного поля.

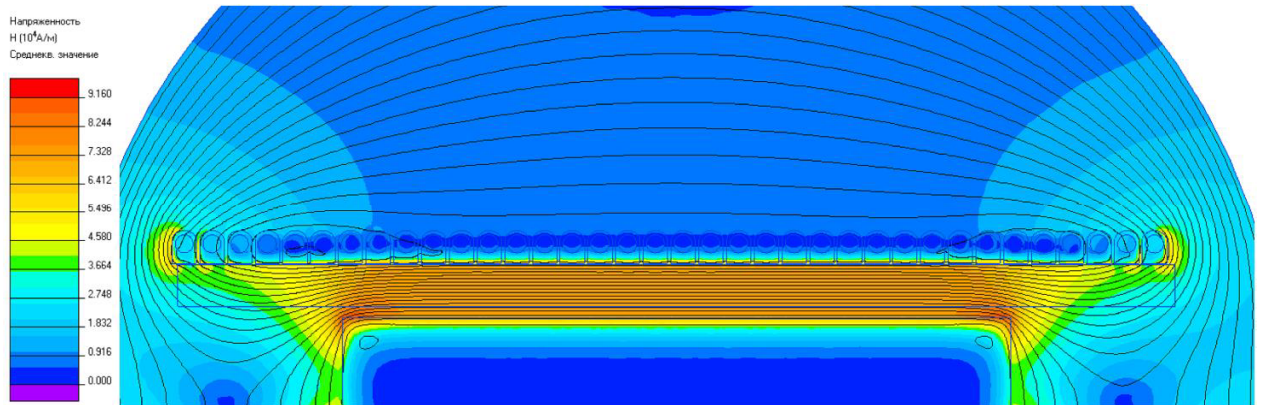


Рисунок 6.10 - Картина распределения напряженности магнитного поля при сквозном нагреве цилиндрической заготовки

График распределения плотности тока по сечению загрузки представлен на рисунке 6.11.

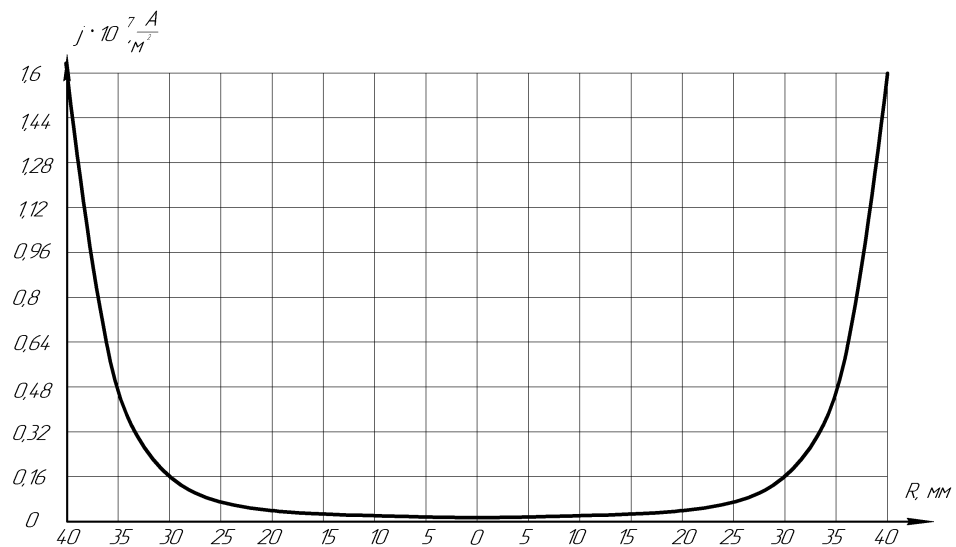


Рисунок 6.11 – График распределения плотности тока по сечению загрузки из латуни

Картина распределения плотности тока представлена на рисунке 6.12. Черными линиями показаны линии магнитного поля, цветная картина – распределение плотности тока.

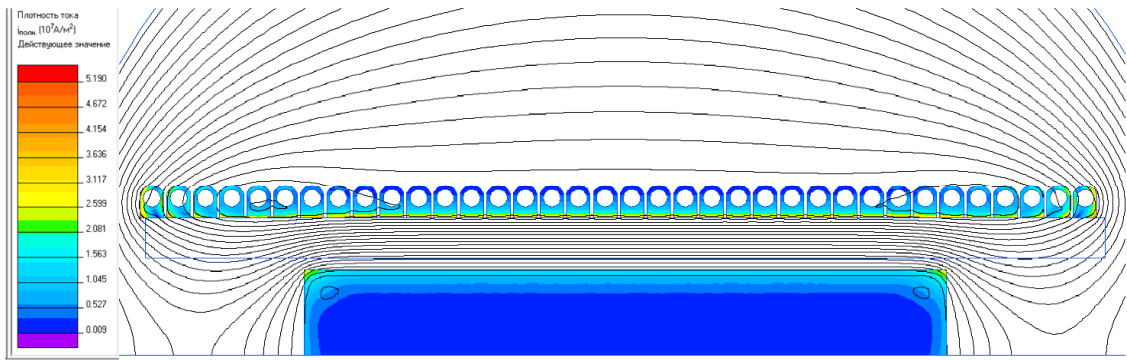


Рисунок 6.12 - Картина распределения плотности тока

Наибольшее значение плотности тока в загрузке на поверхности $j = 1,6 \cdot 10^7 \left[\frac{\text{А}}{\text{М}^2} \right]$, а по толщине материала она уменьшается.

6.3.3 Результаты исследования сквозного нагрева загрузки прямоугольного сечения

Была рассмотрена модель сквозного нагрева загрузки прямоугольного сечения из немагнитного материала – алюминий. Картина напряженности магнитного поля представлена на рисунке 6.13. Черными линиями показаны линии магнитного поля, цветная картина – распределение напряженности магнитного поля.

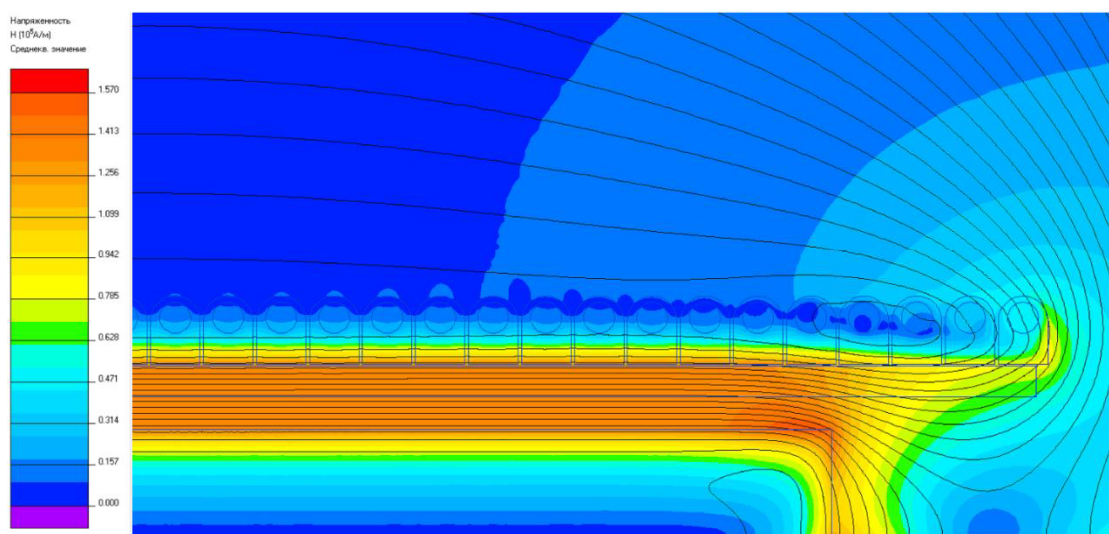


Рисунок 6.13 - Картина распределения напряженности магнитного поля при сквозном нагреве алюминиевой заготовки прямоугольного сечения

График распределения плотности тока по сечению загрузки представлен на рисунке 6.14.

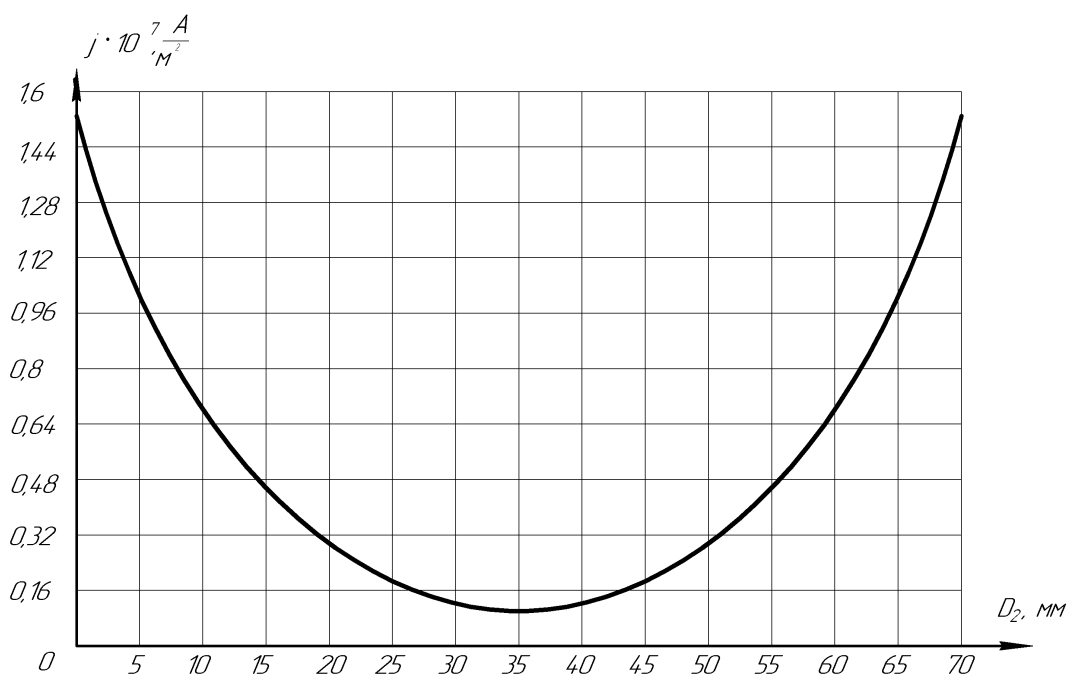


Рисунок 6.14 – График распределения плотности тока по сечению загрузки алюминиевой заготовки прямоугольного сечения

Картина распределения плотности тока представлена на рисунке 6.15. Черными линиями показаны линии магнитного поля, цветная картина – распределение плотности тока. Наибольшее значение плотности тока в загрузке на поверхности $j = 1,53 \cdot 10^7 \left[\frac{\text{A}}{\text{M}^2} \right]$, а по толщине материала она уменьшается.

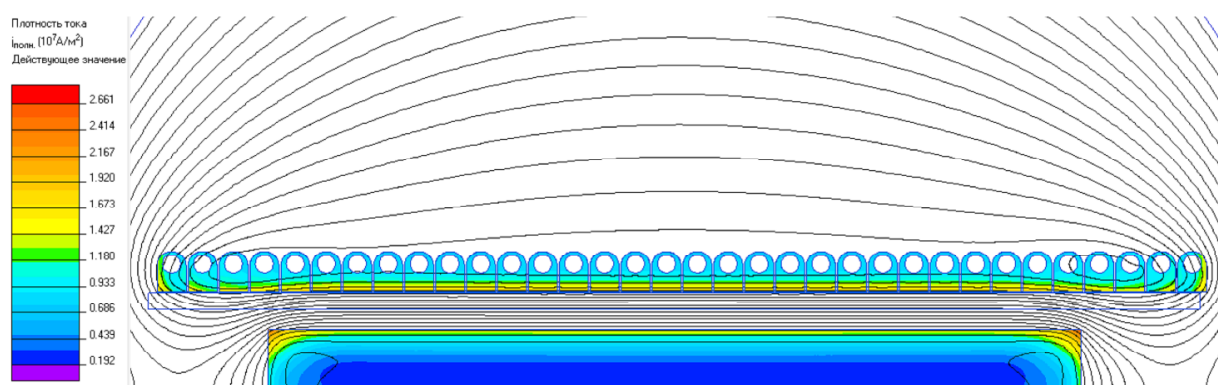


Рисунок 6.15 - Картина распределения плотности тока системы

Картина распределения температуры по сечению загрузки в конце нагрева представлена на рисунке 6.16. Разница температур по объему загрузки составляет $25,57 [^{\circ}\text{C}]$.

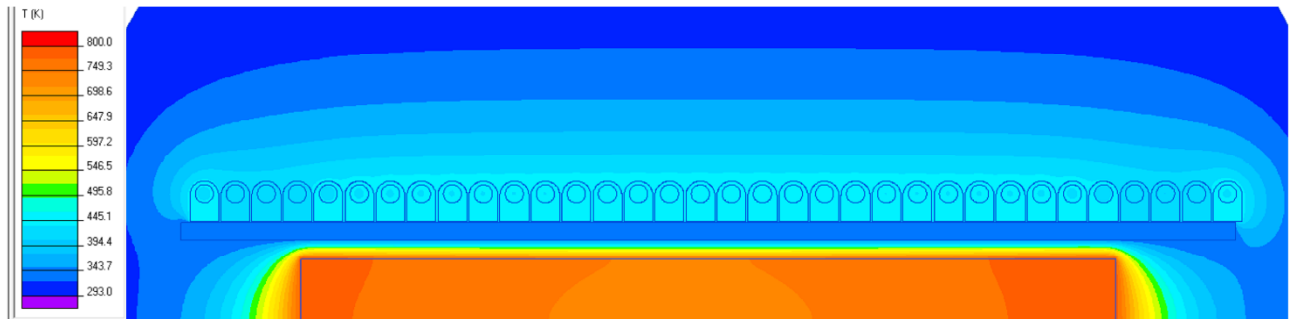


Рисунок 6.16 – Картина распределения температуры по объему алюминиевой загрузки в конце нагрева

Следующим этапом стало моделирование сквозного нагрева загрузки прямоугольного сечения из немагнитного материала – сталь 12Х18Н9Т. Картина напряженности магнитного поля представлена на рисунке 6.17. Черными линиями показаны линии магнитного поля, цветная картина – распределение напряженности магнитного поля.

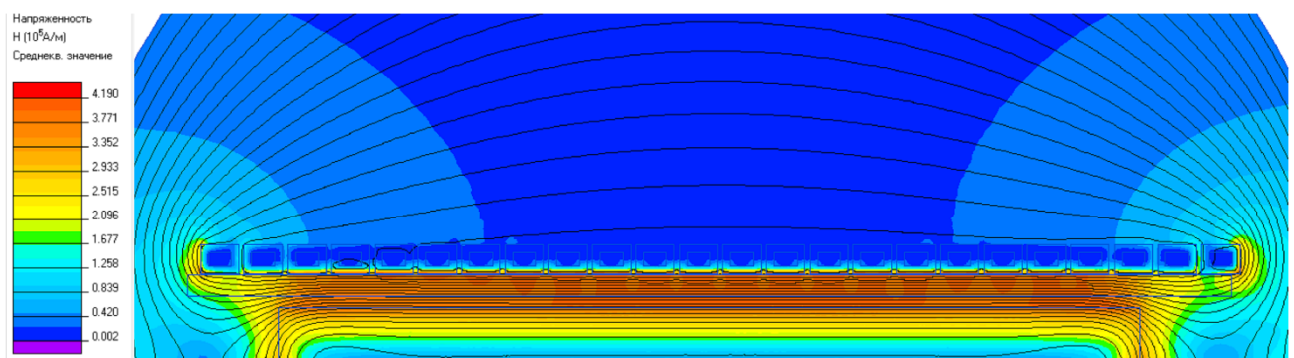


Рисунок 6.17 - Картина распределения напряженности магнитного поля при сквозном нагреве заготовки из стали 12Х18Н9Т прямоугольного сечения

График распределения плотности тока по сечению загрузки представлен на рисунке 6.18.

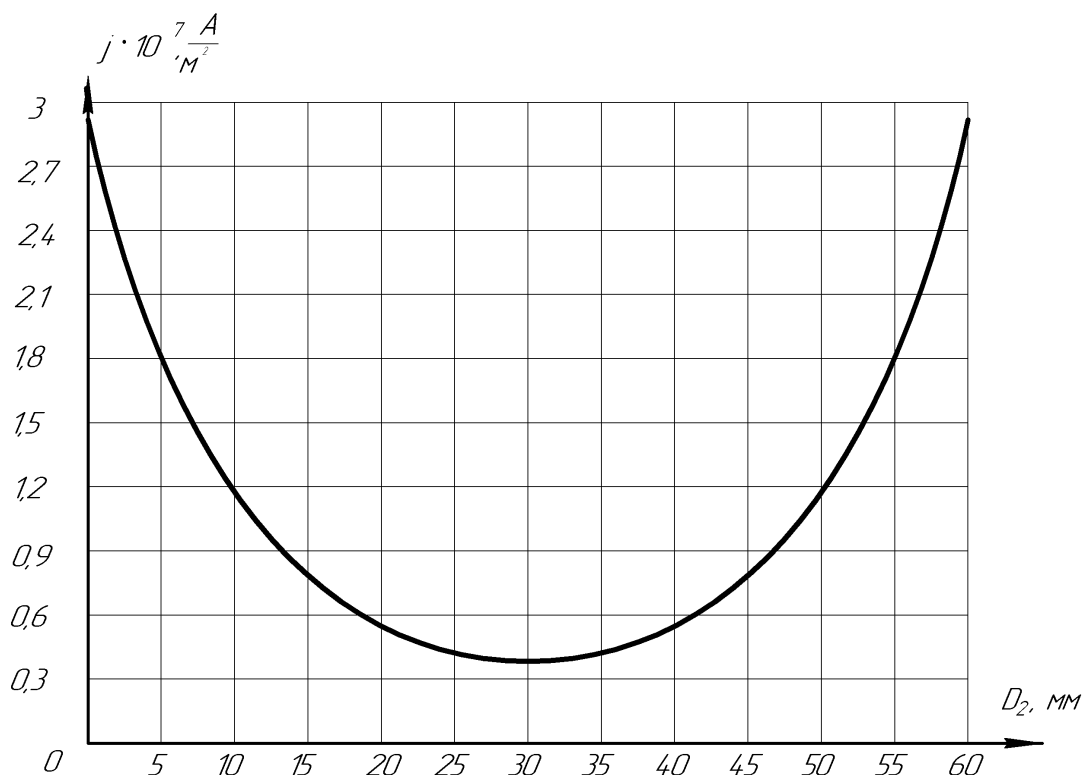


Рисунок 6.18 – График распределения плотности тока по сечению загрузки из стали 12X18H9T

Картина распределения плотности тока системы «индуктор – загрузка прямоугольного сечения» представлена на рисунке 6.19. Черными линиями показаны линии магнитного поля, цветная картина – распределение плотности тока.

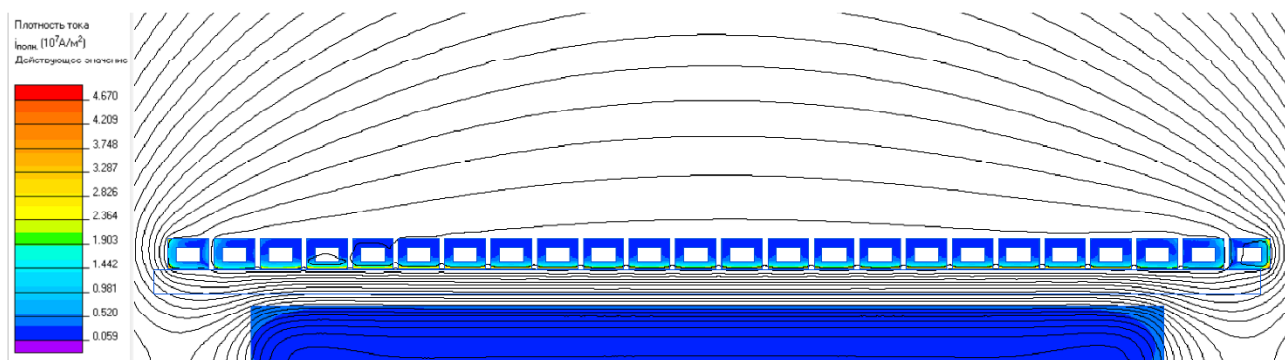


Рисунок 6.19 - Картина распределения плотности тока

Наибольшее значение плотности тока в загрузке на поверхности $j=2,87 \cdot 10^7$ $\left[\frac{\text{А}}{\text{М}^2} \right]$, по толщине материала плотность уменьшается.

Картина распределения температуры по сечению загрузки в конце нагрева представлена на рисунке 6.20. Разница температур по объему загрузки составляет $118,67 [^{\circ}\text{C}]$.

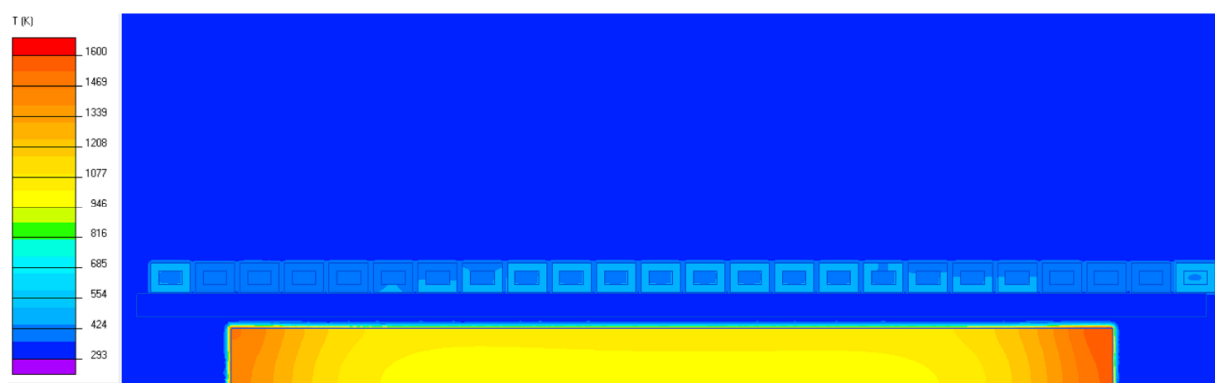


Рисунок 6.20 – Картина распределения температуры по объему загрузки из стали 12Х18Н9Т в конце нагрева